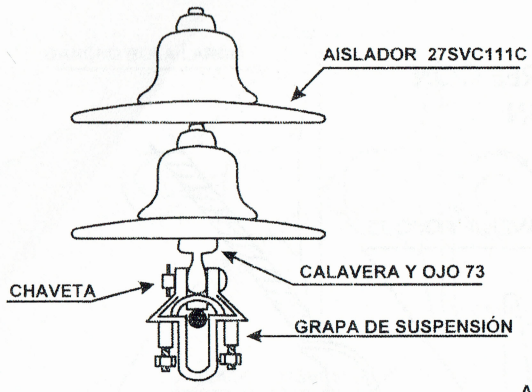
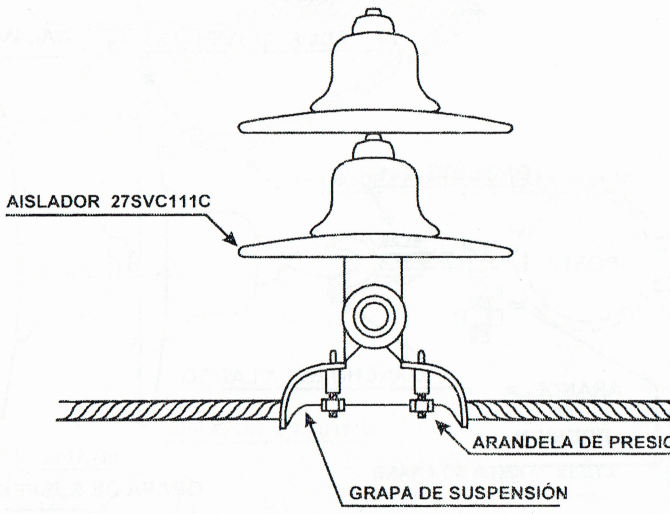
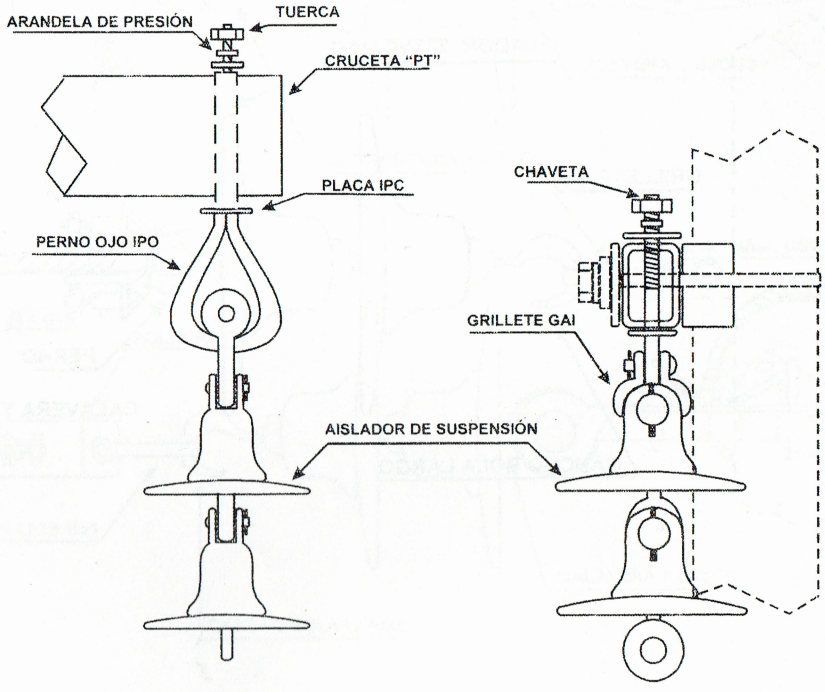




MONTAJE DE AISLADORES EN SUSPENSIÓN
EN POSTES DE REDES DE DISTRIBUCIÓN AÉREAS



2

LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN Y REDES DE DISTRIBUCIÓN

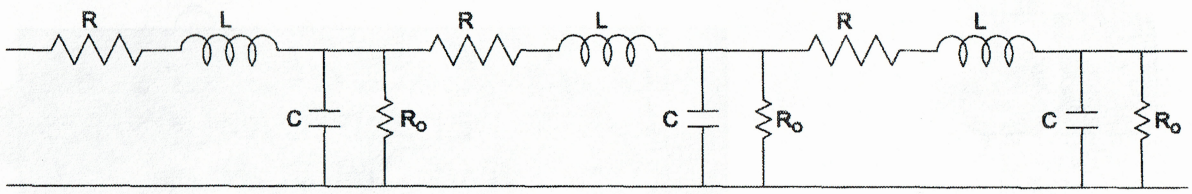
2.1 INTRODUCCIÓN

Los parámetros de una línea de transmisión o de una red de distribución que influyen sobre los valores de la tensión y de la corriente, al principio y al final de la propia línea, y en parte de la red en la cual se encuentran conectados, son:

- La resistencia R y la reactancia X de los conductores por los que circula la corriente, que determina la caída de tensión, de manera que la tensión varía de un punto a otro de la línea, constituyen lo que se conoce como la impedancia serie de la línea: $Z = R + jX$.

- La conductancia G y la susceptancia B en derivación entre los conductores de la línea, que bajo la acción de la tensión existente entre los conductores mismos absorben una corriente transversal, de manera que la corriente principal en los conductores varía de un punto a otro de la línea; constituyen lo que se conoce como la admitancia transversal de la línea: $\gamma = G + j\,B$.

- Estos parámetros se encuentran uniformemente distribuidos a lo largo de la línea. Los valores de estos parámetros se refieren, por lo general, a 1 Km de línea y se les denomina: **"CONSTANTES FUNDAMENTALES DE LA LÍNEA"**, y son aplicables a los alimentadores primarios de las redes de distribución.



REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA, DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

2.2 RESISTENCIA

La resistencia por kilómetro de un conductor, si se indica por la resistividad en Ohm-mm^2/km del material constituyente del conducto y por A, su sección en mm^2 está dada para el caso de los conductores cilíndricos, por medio de la expresión:

$$r = \frac{\rho}{A} \; Ohms / Km$$

Para los conductores "**cableados**", es decir, formados por varios hilos, la resistencia por kilómetro, se puede expresar como:

$$r = K \frac{\rho}{A} \; Ohms / Km$$

Donde K es un coeficiente, que varía de 1.01 a 1.04, pasando de las pequeñas secciones a las grandes, y que toma también en cuenta la longitud efectiva de los conductores elementales (hilos) que forman el cableado; el valor de esta resistencia, se da normalmente en tablas de características de conductores.

La resistencia de un conductor por kilómetro de desarrollo topográfico de línea es ligeramente superior a aquella que se da en tablas, ya que la longitud efectiva del conductor es mayor por efecto de la catenaria, uniones, etcétera.

RESISTENCIA ELÉCTRICA NOMINAL DE CONDUCTORES ELÉCTRICOS A CD EN OHM/KM A 25°C

Calibre AWG/kCM	Alambres			Cables en cableado concéntrico				
	Aluminio	Cobre		Aluminio	Cobre			
		Desnudos	Estañados	Clases B,C,D.	Desnudos Clase B,C,D.	Estañados		
						Clase B	Clase C	Clase D
14	--	8.43	8.76	--	8.63	8.96	9.15	
13	--	6.69	6.96	--	6.62	7.09	7.25	--
12	8.73	5.32	5.51	8.86	5.45	5.64	5.74	--
11	--	4.23	4.40	--	4.30	4.46	4.46	--
10	5.48	3.35	3.48	5.58	3.41	3.54	3.54	--
9	4.33	2.65	2.73	4.43	2.71	2.81	2.81	--
8	3.44	2.10	2.16	3.51	2.14	2,11	2.22	2.23
7	2.73	1.67	1.71	2.79	1.70	1.76	1.76	1.76
6	2.17	1.32	1.36	2.21	1.35	1.40	1.40	1.40
5	1.72	1.05	1.08	1.75	1.07	1.11	1.11	1.11
4	1.36	0.830	0.856	1.39	0.846	0.882	0.882	0.882
3	1.08	0.659	0.679	1.10	0.672	0.699	0.699	0.699
2	0.856	0.522	0.538	0.872	0.531	0.554	0.554	0.554
1	0.679	0.413	0.426	0.692	0.423	0.440	0.440	0.440
1/0	0.538	0.328	0.335	0.551	0.335	0.348	0.348	0.348
2/0	0.426	0.260	0.267	0.436	0.266	0.276	0.276	0.276
3/0	0.338	0.207	0.212	0.344	0.211	0.219	0.219	0.219
4/0	0.269	0.164	0.168	0.274	0.167	0.172	0.174	0.174
250	0.228	--	--	0.232	0.141	0.147	0.147	0.147
300	0.190	--	--	0.194	0.118	0.123	0.123	0.123
350	0.162	--	--	0.166	0.101	0.105	0.105	0.105

* El cableado concéntrico incluye cables comprimidos y compactados

FACTORES DE CONVERSIÓN CA/CD PARA CALCULAR LA RESISTENCIA ELÉCTRICA DE CONDUCTORES DE COBRE Y ALUMINIO EN CABLEADO CONCÉNTRICO, A 60 Hz

Calibre AWG/kCM	Sin cubierta metálica Nota 1		Con cubierta metálica Nota 1	
	1		1	
	Cobre	Aluminio	Cobre	Aluminio
Hasta 3	1.000	1.000	1.00	1.00
2	1.000	1.000	1.01	1.00
1	1.000	1.000	1.01	1.00
1/0	1.001	1.000	1.02	1.00
2/0	1.001	1.001	1.03	1.00
3/0	1.002	1.001	1.04	1.01
4/0	1.004	1.001	1.05	1.01
250	1.005	1.002	1.06	1.02
300	1.006	1.003	1.07	1.02
350	1.009	1.004	1.08	1.03
400	1.011	1.005	1.10	1.04
500	1.018	1.007	1.13	1.06
600	1.025	1.010	1.16	1.08
750	1.039	1.015	1.21	1.11
1000	1.067	1.026	--	1.19
1250	1.102	1.040	--	1.27
1500	1.142	1.058	--	1.36
1750	1.185	1.079	--	1.46
2000	1.233	1.100	--	1.56

Nota 1. Usar la columna 1 para:

1. Cable monoconductores sin cubierta metálica en el aire o en ductos no metálicos
2. Cables monoconductores con cubierta metálica instalados con las cubiertas aisladas, en aire o en ductos no metálicos (un conductor por ducto).

Nota 1. Usar la columna 2 para:

1. Cables multiconductores con cubierta metálica.
2. *Cables multiconductores sin cubierta metálica en conduit metálico*
3. Dos o más cables monoconductores sin cubieta metálica en el mismo conduit metálico.
4. Cables multiconductores sin cubierta metálica en el aire o en ductos no metálicos.

La columna 2 incluye las correcciones por efecto piel, proximidad y todas las demás pérdi inductivas en CA.

FACTORES DE CORRECCIÓN POR TEMPERATURA PARA OBTENER LA RESISTENCIA ELÉCTRICA DE CONDUCTORES DE COBRE O ALUMINIO A TEMPERATURAS DIFERENTES DE 25°C

TEMPERATURA DEL CONDUCTOR	FACTORES DE CORRECCIÓN POR TEMPERATURA	
C°	Cobre	Aluminio
0	0.904	0.901
5	0.923	0.921
10	0.942	0.941
15	0.961	0.960
20	0.981	0.980
25	1.000	1.000
30	1.019	1.020
35	1.038	1.039
40	1.058	1.059
45	1.077	1.079
50	1.096	1.099
55	1.116	1.119
60	1.135	1.138
65	1.154	1.158
70	1.173	1.178
75	1.193	1.198
80	1.212	1.217
85	1.231	1.237
90	1.250	1.257

Ejemplo:

Para corregir la resistencia eléctrica de un cable desnudo de cobre en cableado concéntrico clase B calibre 1/0 AWG a 75°C, de la tabla de resistencias eléctricas a 25°C, se obtienen 0.335 ohm/km., valor

que se corrige usando el factor de 1.193 que aparece arriba p
cobre a 75°C, dando 0.400 ohm/km.

El valor de esta resistencia se da como referencia en corrie
continua, y se va afectando por los siguientes factores:

A) EFECTO SUPERFICIAL POR LA CORRIENTE ALTERNA.

Esto es debido a que cuando los conductores operan con corrie
alterna, se presenta el fenómeno de autoinducción superficial, c
depende de la sección del conductor y del material. Esto hace que
conductor de hasta 25 mm^2 pueda incrementar su valor hasta en
8%.

B) EFECTO DE RUGOSIDAD E IRREGULARIDAD.

Debido a que los conductores no son cilíndricos, al estar formad
por cables (varios hilos),se presenta el problema de irregularidad
por tal razón, se introduce el factor K, que en realidad representa
incremento en la resistencia, que va desde el 1 hasta el 4%.

C) EFECTO DE TEMPERATURA.

La resistencia de los conductores se refiere normalmente a u
temperatura de 20 °C, por lo que se debe corregir a la temperatu
efectiva de funcionamiento ***t*** (determinada por la temperatu
ambiente y por el sobrecalentamiento debido a la carga). EL valor
esta resistencia se corrige por efecto de temperatura, con
expresión:

$$r = r^{20^\circ C}(1 + \alpha\ (\ t - 20\ ))$$

Donde:

α = 0.0039 para el cobre.

α = 0.040 para el aluminio.

α = 0.037 para el ACSR.

RESISTENCIA ELÉCTRICA NOMINAL DE CONDUCTORES ELÉCTRICOS A CD EN OHM/KM A 25°C

Calibre AWG/kCM	Alambres			Cables en cableado concéntrico				
	Aluminio	Cobre		Aluminio	Cobre			
		Desnudos	Estañados	Clases B,C,D.	Desnudos Clase B,C,D.	Estañados		
						Clase B	Clase C	Clase D
14	--	8.43	8.76	--	8.63	8.96	9.15	
13	--	6.69	6.96	--	6.62	7.09	7.25	--
12	8.73	5.32	5.51	8.86	5.45	5.64	5.74	--
11	--	4.23	4.40	--	4.30	4.46	4.46	--
10	5.48	3.35	3.48	5.58	3.41	3.54	3.54	--
9	4.33	2.65	2.73	4.43	2.71	2.81	2.81	--
8	3.44	2.10	2.16	3.51	2.14	2,11	2.22	2.23
7	2.73	1.67	1.71	2.79	1.70	1.76	1.76	1.76
6	2.17	1.32	1.36	2.21	1.35	1.40	1.40	1.40
5	1.72	1.05	1.08	1.75	1.07	1.11	1.11	1.11
4	1.36	0.830	0.856	1.39	0.846	0.882	0.882	0.882
3	1.08	0.659	0.679	1.10	0.672	0.699	0.699	0.699
2	0.856	0.522	0.538	0.872	0.531	0.554	0.554	0.554
1	0.679	0.413	0.426	0.692	0.423	0.440	0.440	0.440
1/0	0.538	0.328	0.335	0.551	0.335	0.348	0.348	0.348
2/0	0.426	0.260	0.267	0.436	0.266	0.276	0.276	0.276
3/0	0.338	0.207	0.212	0.344	0.211	0.219	0.219	0.219
4/0	0.269	0.164	0.168	0.274	0.167	0.172	0.174	0.174
250	0.228	--	--	0.232	0.141	0.147	0.147	0.147
300	0.190	--	--	0.194	0.118	0.123	0.123	0.123
350	0.162	--	--	0.166	0.101	0.105	0.105	0.105

* El cableado concéntrico incluye cables comprimidos y compactados

2.3 REACTANCIA INDUCTIVA

La reactancia inductiva X de un circuito eléctrico, se puede defi como el voltaje o fuerza electromotriz de autoinducción, que genera en el circuito cuando circula una corriente unitaria. Si por conductor circula una corriente I, el voltaje de autoinducción será:

$$E = j\,X_L I = j\ \omega L I$$

Siendo L, la inductancia propia.

En el caso de una línea de transmisión trifásica, al voltaje autoinducción se le agregan los voltajes de inducción mutua conductor considerado; este efecto es debido a la corriente q circula por los otros conductores. Refiriéndose a 1 Km de conduct de línea, para el conductor de la fase ***a***, se tiene:

$$Ea = j\omega\ maa\ Ia\ + j\omega\, mab\, Ib + j\omega\, mac\, Ic$$

Donde:

maa, mab, mac, son los coeficientes de autoinducción e inducci mutua por kilómetro de línea. Para los otros conductores, se pue escribir una expresión análoga.

En un cálculo aproximado:

$$mab = mac = mbc = m$$
$$maa = mbb = mcc = L'$$

Si las corrientes de fase están balanceadas:

$$I_b = I_c = I_a$$

Por lo tanto:

$$E_a = j\omega\ (L' - 2m)\ Ia = j\omega L\, I_a = X_L\, I_a$$

L'-m = L = Inductancia de servicio del conductor.

El valor de esta inductancia se calcula como:

$$L = 4.606 \times 10^{-7} \, LOG \frac{DMG}{RMG} \, Henry / m$$

Donde:

DMG = Distancia media geométrica.

El valor de la DMG se calcula como se indica a continuación:

$$DMG = \sqrt[n]{D_{12} \quad D_{13} \quad D_{23}}$$

Siendo:

n = Número de conductores de la línea; D_{12}, D_{13}, D_{23}, etc. Las distancias entre conductores.

RMG se conoce como el radio medio geométrico del conductor, y es aplicable a los conductores eléctricos formados por varios hilos trenzados; y por lo mismo, no son perfectamente cilíndricos, por lo que el "radio" del conductor no es exacto.

Por otra parte, el flujo interno o inducción interna, se presenta en cada uno de los hilos del conductor, por lo que se calcula como la media geométrica de los flujos instantáneos, por cada hilo del conductor.

Para los fines de cálculo, se refleja o expresa en función de la geometría propia del conductor, como un radio equivalente que se conoce como: "Radio Medio Geométrico" (RMG); que se expresa como referencia al radio de un conductor cilíndrico homogéneo equivalente.

El valor del RMG depende principalmente de los siguientes factores:

- El número de materiales, de que está hecho el conductor.

- Del número de hilos que forma al conductor.
- Del número de capas en que se encuentran distribuidos hilos del conductor.

Algunos valores de RMG se pueden calcular con las expresion siguientes, aún cuando normalmente se dan en las tablas características de conductores.

Para conductor de un solo material	
7 hilos	0.776 r
19 hilos	0.758 r
37 hilos	0.768 r
61 hilos	0.772 r

Para conductores de aluminio, con alma de acero, (ACSR)	
30 hilos (2 capas)	0.826 r
26 hilos (2 capas)	0.809 r
54 hilos (3 capas)	0.810 r

La reactancia inductiva de la línea se calcula a partir de la expres general, para los circuitos eléctricos:

$$X_L = 2\pi f \; L$$

$$X_L = 0.00289\, f \;\; LOG \frac{DMG}{RMG} \;\; OHMS / KM$$

Para la frecuencia de 60 Hz

$$X_L = 0.1736 \;\; LOG \frac{DMG}{RMG} \;\; OHMS / KM$$

Cuando por alguna razón no se dispone del valor del RMG, se pu tomar en su lugar el radio (r) del conductor.

Ejemplo

Calcular la impedancia serie de una línea de transmisión de 230 kV, 300 km de longitud, que usa un conductor por fase de 900 kCM, canario, de las siguientes características:

Diámetro externo 29.5 mm, ACSR 65/7, resistencia a 60 Hz, y 50 °C, 0.073 /Km.

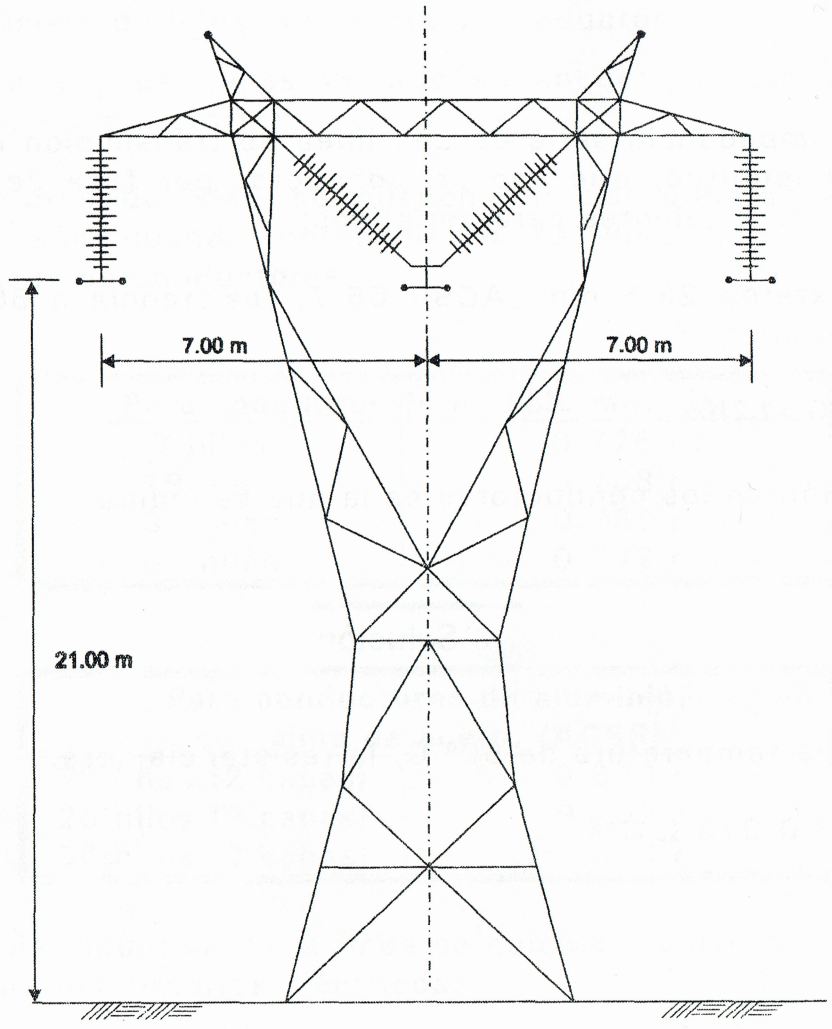
$$RMG = 1.210\ cm$$

La disposición de los conductores es la que se indica.

Solución

Tomando una temperatura de 50° C, la resistencia será:

$$r = 0.073\ \Omega/KM.$$



$$R = r \times \ell = 0.073 \times 300 = 21.9\ \Omega$$

La reactancia inductiva se calcula como:

$$X_L = 0.1736\, LOG \frac{DMG}{DMG}$$

$$DMG = \sqrt[3]{D_{ab}\ D_{bc}\ D_{ca}}$$

$$DMG = \sqrt[3]{7 \times 7 \times 14} = 8.82m$$

$$X_L = 0.1736 \; LOG \frac{882}{1.21} = 0.497 \; \Omega / km$$

Para $\ell = 300 \; Km$

$$X_L = 0.497 \; x \; 300 = 149 \; \Omega$$

El circuito serie de la línea es:

2.3.1 LAS TRANSPOSICIONES DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

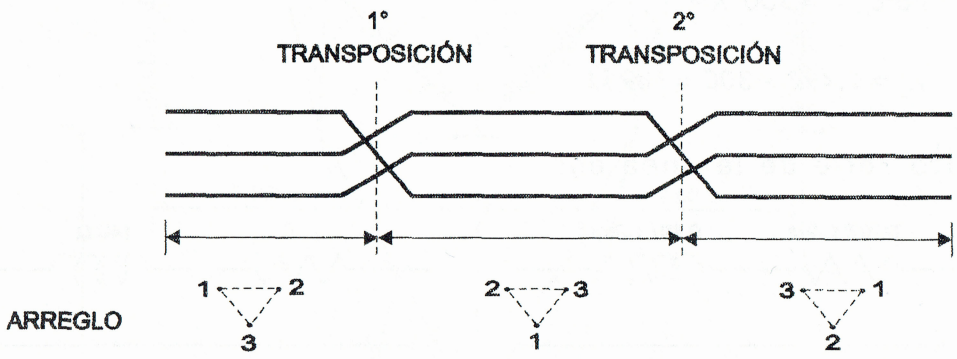
En las torres de las líneas de transmisión, por lo general la disposición de los conductores de fase no es simétrica, y por esta razón, los efectos de inducción magnética y de distribución de campo eléctrico no son homogéneos; esto hace que la reactancia inductiva de cada fase no sea exactamente igual. Para equilibrar esta condición, se procede a cambiar, en forma alternativa la posición de los conductores de fase, de manera que el promedio permita una distribución uniforme de los campos electromagnéticos.

Las transposiciones se hacen a determinado valor de la longitud de la línea, y la decisión de realizarlas depende de algunos aspectos, como:

- El equilibrio de las reactancias inductivas para la longitud total de las líneas de transmisión; no necesariamente logra una capacidad de transmisión mayor, por lo que en este punto de vista no es importante la realización de transposiciones.

- Efectuar transposiciones requiere del uso de torres especiales (torres de transposición) en los puntos donde se efectúan; por su diseño, estas torres pueden representar posibles puntos de falla en la línea, debido a menores distancias eléctricas.

- En los casos en que la protección de la línea de transmis requiera una mayor exactitud en el balance de los cam electromagnéticos, se deben efectuar las transposiciones.

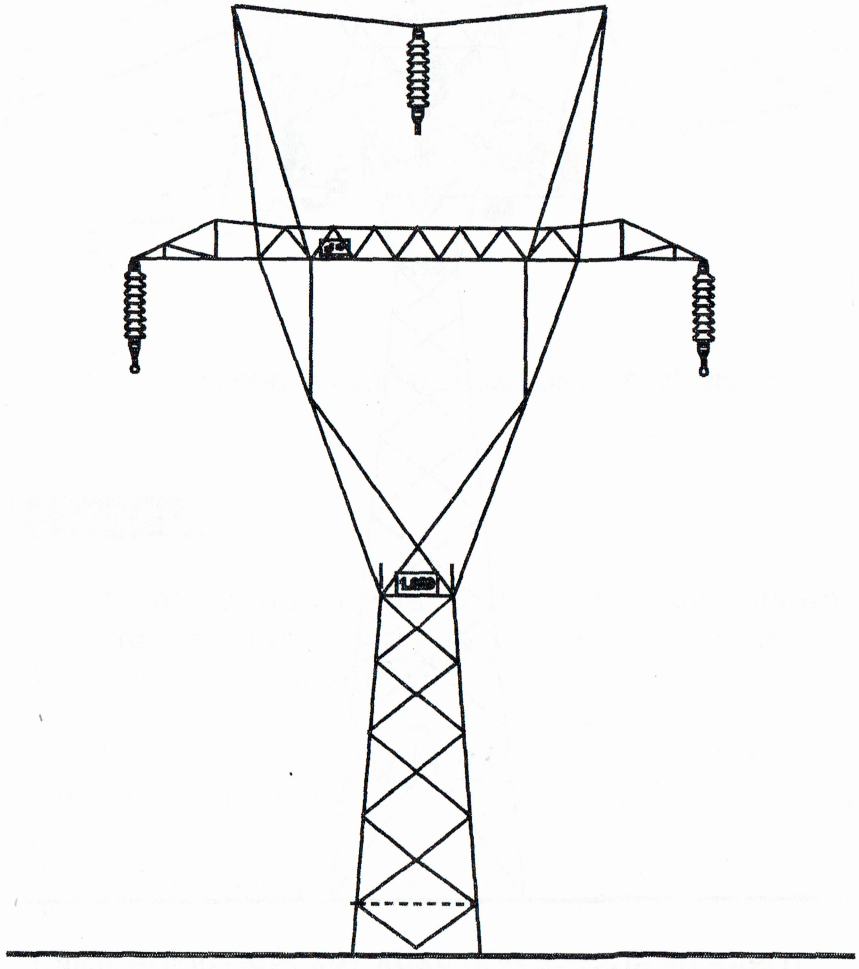


La inductancia promedio se calcula, como la suma de inductancias en cada sección de transposición, entre el número transposiciones.

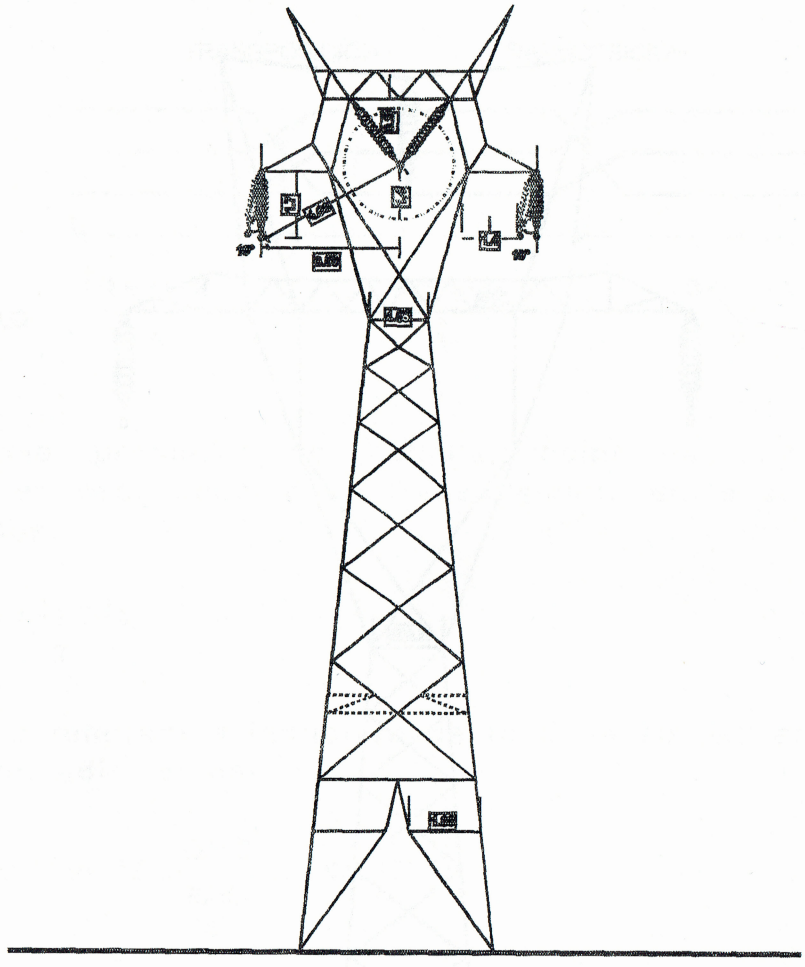
$$L = \frac{L_1 + L_2 + L_3}{3}$$

Finalmente, la reactancia inductiva de la línea se expresa como reactancia promedio, es decir:

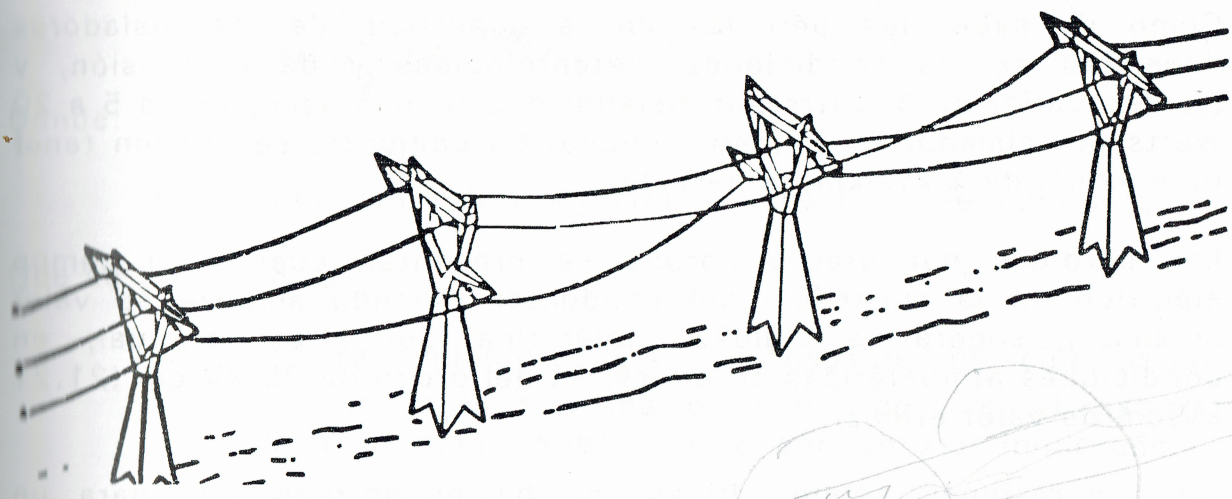
$$X_L = 0.1736 \ \ LOG \frac{DMG}{RMG} \ \ \Omega / KM / FASE$$



TORRE DE TENSIÓN PARA TRANSPOSICIÓN 400KV



TORRE DE SUSPENSIÓN PARA TRANSPOSICIÓN 400KV



ESQUEMA DE TRANSPOSICIÓN EN SUSPENSIÓN

2.4 CONDUCTANCIA

A lo largo de todo el conductor de la línea de transmisión, se irradia al espacio circundante una corriente, cuya componente activa se debe a las pérdidas en el dieléctrico.

El parámetro que tiene en cuenta estas pérdidas transversales es la conductancia por kilómetro, cuyo valor se calcula con la expresión:

$$g = \frac{P}{E^2} \times 10^{-3} \, SIEMENS / Km$$

Donde:

P = Pérdidas en kW, por kilómetro de conductor.

E = Tensión de fase a tierra en kV.

Las pérdidas de dispersión en las líneas aéreas, son de dos tipos: pérdidas en la superficie de los aisladores y pérdidas por efecto corona.

Como se sabe, las pérdidas en la superficie de los aislad dependen de las condiciones meteorológicas y de la tensió pueden variar de 3 watts por aislador con tiempo seco, hasta 5 watts por aislador en tiempo lluvioso. En conjunto, se pueden t un máximo de 1 kW/km de pérdidas.

Las pérdidas por efecto corona se presentan cuando el ca eléctrico en la superficie del conductor (cuando alcanza su máximo), supera la rigidez dieléctrica del aire, la cual, condiciones atmosféricas normales, es del orden de 30 kV/cm (2 kV/cm de valor eficaz).

Con expresiones semiempíricas, se ha encontrado que para conductor cilíndrico, el efecto corona se manifiesta cuand gradiente en la superficie supera al valor dado por la expresión:

$$K_C = (21.2\,\delta + 0.424\,\frac{\delta}{d})\ kV/cm$$

Donde:

d = Diámetro del conductor en cm.

δ = Densidad relativa del aire, que se toma como 1 a 2 y 760 mm de presión barométrica, y se calcula con la expresión:

$$\delta = \frac{0.392\,P}{273+T}$$

Donde:

P = Presión barométrica en mm de mercurio.

T = Temperatura en °C

En el caso de las líneas de transmisión trifásicas, por efecto capacitancia de los conductores, el gradiente de potencial E obtiene con tiempo seco, cuando la tensión eficaz de fase A tor siguiente valor:

$$E_C = 49.2\, M\, \delta \frac{d}{2} LOG \frac{DMG}{r} (kV)$$

Donde:

M = Coeficiente de irregularidad superficial del conductor.

Que se forma como:

M = 1 para conductores cilíndricos lisos de operación, de un conductor de la misma forma que, como en el caso de la reactancia, se introdujo el concepto de inductancia.

M = 0.83 para conductores cableados (formados por varios hilos)

DMG = Distancia media geométrica entre conductores.

EC, se le conoce como la tensión crítica en tiempo seco, cuando el tiempo es húmedo la tensión crítica es aproximadamente el 80% del valor de EC.

El efecto corona se verifica para E > EC y conduce a una ionización del aire circulante, con la consecuente pérdida de energía que se calcula para cada conductor, con la siguiente fórmula empírica:

$$PC = \frac{2.41}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{d}{2\ DMG}} (E - EC)^2 \times 10^{-3} \frac{kW}{KM}$$

Siendo f, la frecuencia en Hz.

En las líneas de transmisión, se busca el modo de que, en condiciones atmosféricas E < EC, y como el valor de EC depende más del diámetro del conductor que da la separación entre ellos, para cada valor de la tensión de operación existe un límite inferior para el diámetro del conductor, que permite limitar las pérdidas por efecto corona.

2.5 SUSCEPTANCIA

Para calcular la susceptancia de una línea trifásica es neces
introducir el concepto de capacitancia de operación de un conduc
de la misma forma; que como en el caso de la reactancia,
introdujo el concepto de inductancia. La capacitancia de operac
es aquella cantidad que multiplicada por E da en valor un número
corriente total capacitiva a lo largo de un conductor, con respect
tierra o con respecto a los otros conductores, se compone de
términos:

- Un primer término **jω Caa Ea**, que representa la corrie
capacitiva, debida a la capacitancia del conductor respect
tierra.

- Los otros dos términos **jω C_{ab} V_{ab}**, y **jωC_{ac} V_{ac}**, representar
corriente derivada del conductor "A" por efecto de
capacidad, con respecto a los conductores
respectivamente.

En forma análoga, se tienen tres términos para los otros
conductores, y si éstos se encuentran dispuestos en forma simétr

$$c^1 = C_{ab} = c_{bc} = C_{ac}$$

$$c_o = C_{aa} = C_{bb} = C_{cc}$$

Si los voltajes de fase a neutro son balanceados:

$$V_{ab} + V_{ac} = 3\,E_a$$

De donde:

$$I_a = j\omega(C_{aa}\ E_a + C_{ab}\ V_{ab} + C_{aa}\ V_{ac})$$

$$I_a = j\omega(C_o + 3C^1)E_a = j\omega\, C\, E_a$$

La capacitancia de operación es, por lo tanto:

$$C = (C_O + 3C^1)$$

La correspondiente susceptancia de operación:

$$b = \omega c = \omega(C_O + 3C^1)$$

Para una línea de transmisión trifásica, la capacitancia al neutro es:

$$Cn = \frac{0.0241}{LOG\frac{DMG}{RMG}}\ \mu F / KM / FASE$$

La susceptancia al neutro es:

$$bn = \frac{9.085 \times 10^{-6}}{LOG\frac{DMG}{RMG}}\ SIEMENS - KM / FASE$$

Ejemplo

En una línea de transmisión de 230 kV, se tienen 15 aisladores por cadena y un claro medio de 350 m. Tomando en cuenta los amarres, resulta una media de 90 aisladores por kilómetro de conductor. Suponiendo que con tiempo seco se tiene una media de 2 watts por aislador, calcular las pérdidas y la conductancia en la línea. La distancia media geométrica es de 8.24 m. y el diámetro del conductor 2.69 cm.

Solución

Las pérdidas a lo largo de la superficie de aisladores resultan en total de:

$$P_a = kW(cada\ aislador)\ X\ media\ de\ aisladores 0.002 \times 90 = 0.18 kW / KM$$

Con tiempo seco a 20° C y 760 mm de presión ($\delta = 1$), la t
crítica de corona es:

$$\delta = \frac{0.392P}{273+T} = \frac{0.392(769)}{273+20} = 1$$

$$E_C = 49.2\ M\ \delta\ \frac{d}{2}\ LOG\frac{DMG}{r} = 49.2(0.83)(1)\left(\frac{2.69}{2}\right)LOG\left(\frac{8.24}{0.073}\right) = 153$$

Tomando un conductor cableado: M = 0.83

$$E_C = 153\,kV$$

La tensión de fase a neutro, para una tensión nominal de 2
entre fases, es:

$$E = \frac{230}{\sqrt{3}} = 133\,kV$$

Como E < EC, no se tienen pérdidas por efecto corona.

La conductancia por kilómetro es:

$$g = \frac{P_a}{E^2} x10^{-3} = \frac{0.18}{133^2} x10^{-3} = 0.01 x10^{-6}\ \frac{SIEMENS}{KM}$$

Con tiempo húmedo, se tienen alrededor de 10 watts de pé
por aislador, por lo tanto:

$$P_a = 0.01 x 90 = 0.90\,kW/KM$$

La tensión crítica de corona, con tiempo húmedo, se puede
como el 80% de la tensión, en tiempo seco: $E_C = 0.8\,x\,153 = 122\,kV$

Como E > EC (133 > 122), se calculan las pérdidas por corona

$$P_C = \frac{2.41}{1}(60+25)\sqrt{\frac{2.69}{2x824}}(133-122)^2 \times 10^{-3} = 1.001\ kW/KM$$

En total:

$$P = P_a + P_c = 0.90 + 1.001 = 1.901\ kW/KM$$

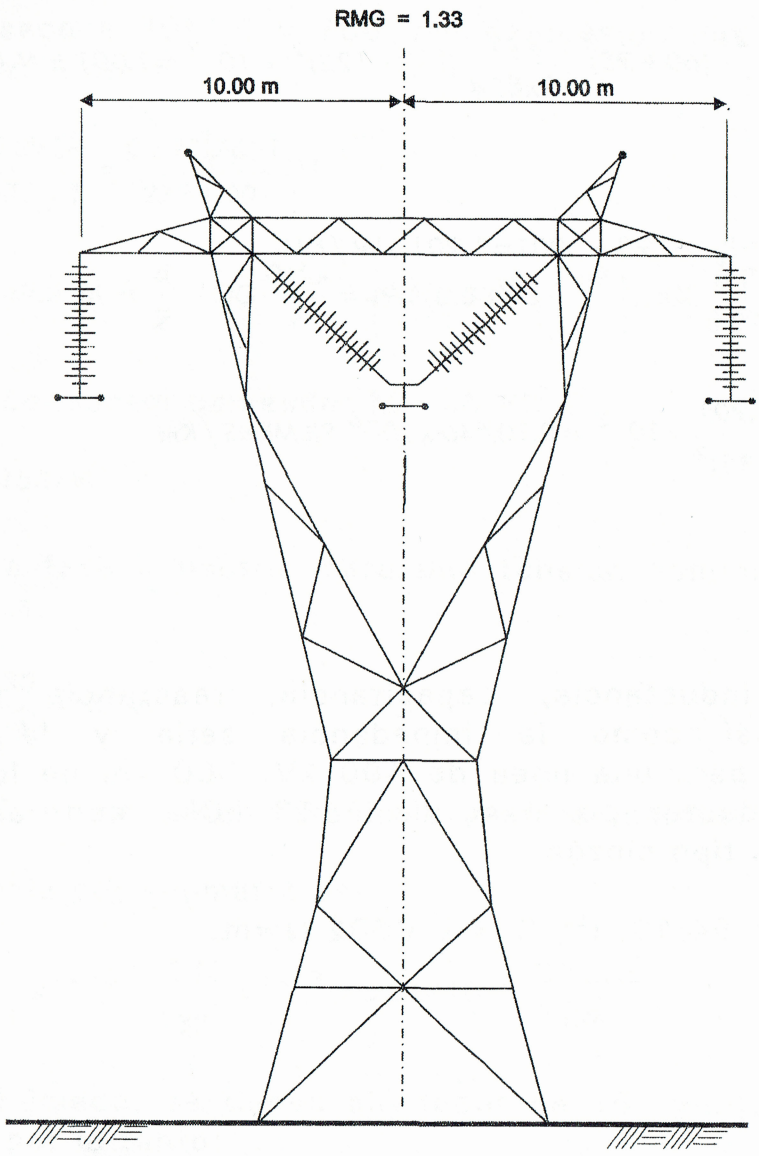
Por lo tanto:

$$P_a = \frac{1.901}{(133)^2} x10^{-3} = 0.10746 \times 10^{-6}\ SIEMENS/Km$$

Ejemplo

Calcular la inductancia, capacitancia, reactancia inductiva y capacitiva, así como la impedancia serie y la impedancia característica para una línea de 400 kV, 300 km de longitud, que tiene un conductor por fase de 1113 kCM, con las siguientes características tipo pinzón:

Dext = 32.8mm, 54/19, r^{60° C = 0.0602 Ω/km.



Solución

$$L = 4.606 \times 10^{-4} \ LOG \frac{DMG}{RMG} H / km / fase$$

$$C = \frac{0.0241}{LOG\frac{DMG}{RMG}} \mu F / KM$$

$$DMG = \sqrt[3]{10 \times 10 \times 20} = 12.6m$$

$$L = 4.606 \times 10^{-4} LOG\frac{1260}{1.33} = 0.0013 H / Km$$

$$C = \frac{0.0241}{LOG\frac{1260}{1.33}} = 8.09 \times 10^{-9} F / kM$$

$$X_L = 0.1736 \ LOG\frac{1260}{1.33} = 0.5167 \ \Omega / KM / FASE$$

La susceptancia capacitiva a 60 Hz:

$$b_c = \frac{9.085 \times 10^{-6}}{LOG\frac{1260}{1.33}} = 3.054 \times 10^{-6} SIEMENS / KM / FASE$$

Suponiendo que se desconozca RMG del conductor, se puede emplear para cálculo los parámetros de la línea $\frac{d}{2}$, radio del conductor tal que:

$$r = 1.64cm$$

$$X_L = 0.1736 \ \ LOG\frac{1260}{1.64} = 0.05 \ \ / KM / FASE$$

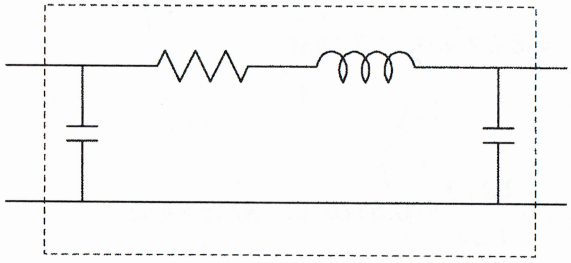
$$b_c = \frac{9.085 \ \times \ 10^{-6}}{LOG\frac{1260}{1.64}} = 3.15 \ \times \ 10^{-6} \ \ SIEMENS / KM - FASE$$

La impedancia serie será:

$$X_L = 0.5167 \times 300 = 154.95\ \Omega / FASE$$

$$B_C = 3.054 \times 10^{-6} \times 300 = 9.162 \times 10^{-4}\ SIEMENS / FASE$$

$$R = 0.0602 \times 300 = 18.06\ \Omega / FASE$$

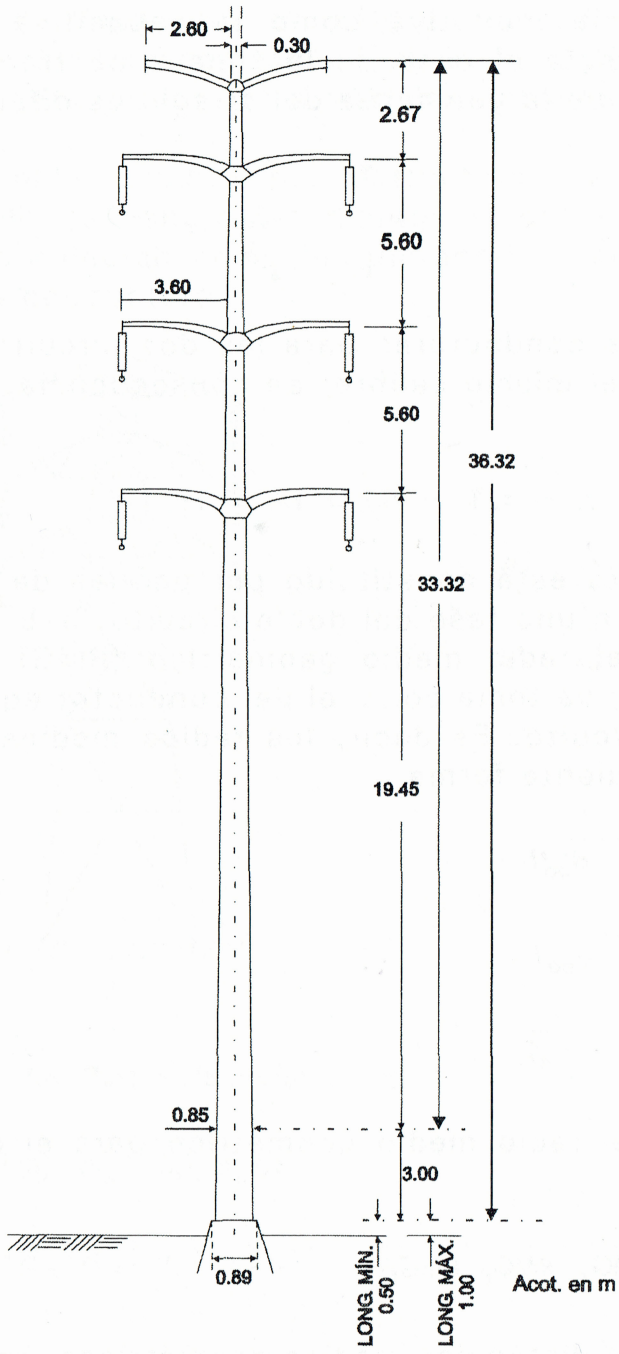


La impedancia característica:

$$Z_C = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{0.0013}{8.09 \times 10^{-3}} = 400.86\ \Omega$$

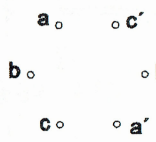
2.6 REACTANCIAS INDUCTIVA Y CAPACITIVA EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE DOBLE CIRCUITO

El uso de líneas de transmisión de doble circuito en una mis estructura, se aplica en casos donde se desea tener un índice confiabilidad aceptable, para una cierta capacidad de transmisión energía eléctrica; o bien, en zonas donde la densidad de poblac impone restricciones del derecho de vía para el uso de líneas transmisión, y entonces, resulta conveniente usar dos circuitos estructura.



TORRE AUTOSOPORTADA PARA 230 KV
(DOS CIRCUITOS, TUBULAR)

Tanto la reactancia inductiva como la capacitiva se calculan
forma semejante para el caso de las líneas de transmisión, con
sólo circuito, aunque la geometría del arreglo es diferente:



Se supone que los conductores para los dos circuitos de la línea
transmisión son del mismo calibre; en consecuencia, tienen el mis
radio, es decir:

$$r_a = r_b = r_c = r_a1 = r_{b1} = r_{c1} = r_1.$$

Como cada circuito está constituido por parejas de conductores,
decir, $a-a^1$ forman una fase del doble circuito, $b-b^1$ y $c-c^1$ las ot
fases, entonces el radio medio geométrico (RMG) no es el de
conductor aislado; se toma como el del conductor equivalente para
fase del doble circuito. Es decir, los radios medios geométricos
calculan en la siguiente forma:

$$RMG_A = \sqrt{r_1 \quad d_{aa}1}$$

$$RMG_B = \sqrt{r_1 \quad d_{aa}1}$$

$$RMG_C = \sqrt{r_1 \quad d_{cc}1}$$

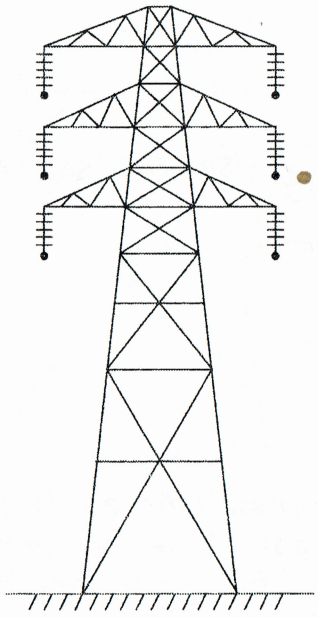
De manera que, el radio medio geométrico para el circuito trifás
equivalente es:

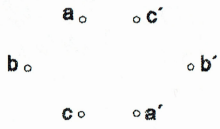
$$RMG = \sqrt[3]{RMG_A \;\; RMG_B \;\; RMG_C}$$

Con respecto a las distancias medias geométricas, se puede proce
en la misma forma, es decir, calculando distancias equivalentes p
los dos circuitos.

Cuando se trata de líneas con un sólo circuito y un conductor por fase, la distancia media geométrica (DMG) se calcula como la raíz enésima de los productos, de las distancias entre los conductores.

Tratándose de doble circuito por estructura, se sigue el mismo razonamiento, sólo que ahora las distancias entre conductores son equivalentes y se calculan como las distancias medias geométricas, entre cada par de conductores.





$$DMG_{AB} = \sqrt[4]{d_{ab}\ d_{ab1}\ d_a1_b\ d_a1_b1}$$

$$DMG_{BC} = \sqrt[4]{d_{bc}\ d_{bc}1\ d_b1_c\ d_b1_c1}$$

$$DMG_{AC} = \sqrt[4]{d_{ac}\ d_{ac}1\ d_a1_c\ d_a1_c1}$$

De manera que la distancia media geométrica de la línea de doble circuito, es entonces:

$$DMG = \sqrt[3]{DMG_{AB}\ DMG_{BC}\ DMG_{AC}}$$

De modo que, la expresión para calcular la reactancia inductiva es

$$X_L = 0.1736 \; LOG \frac{DMG}{RMG}$$

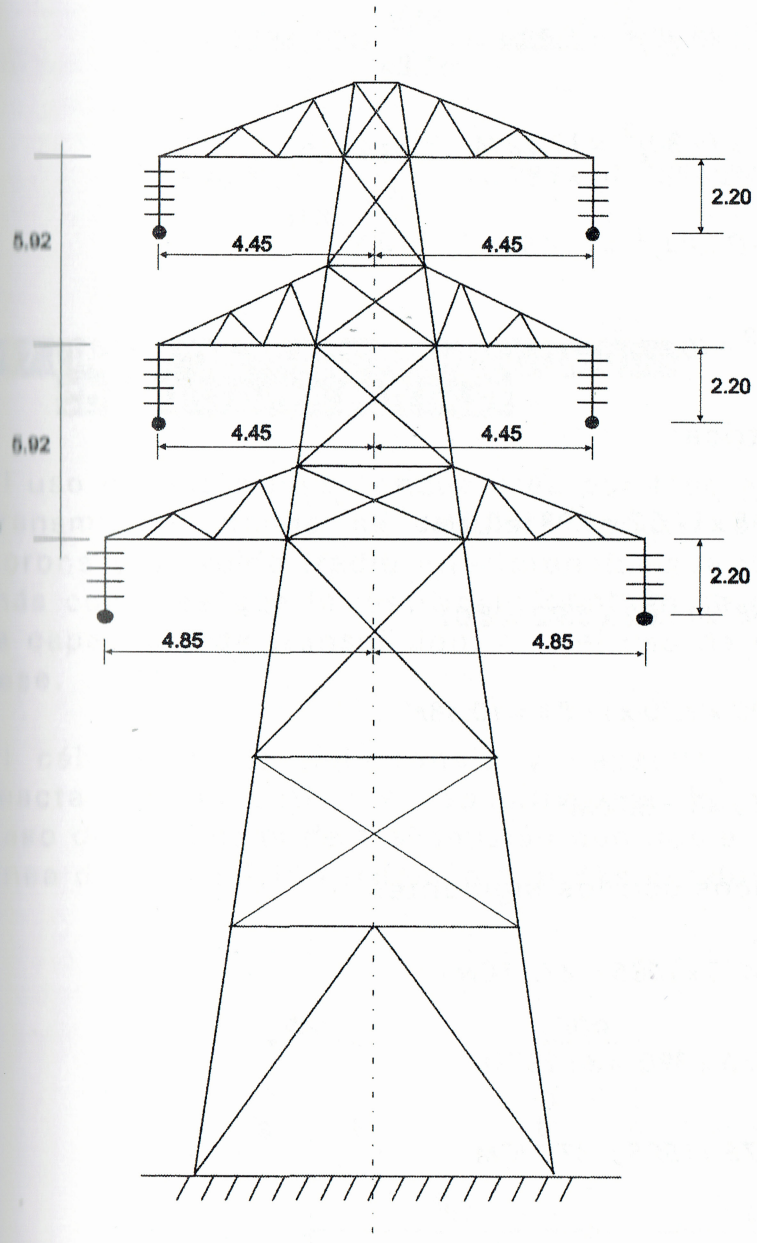
$$X_L = 0.1736 \; LOG \frac{\sqrt[3]{DMG_{AB} \; DMG_{BC} \; DMG_{AC}}}{\sqrt[3]{RMG_A \; RMG_B \; RMG_C}} \; \Omega / KM / FASE$$

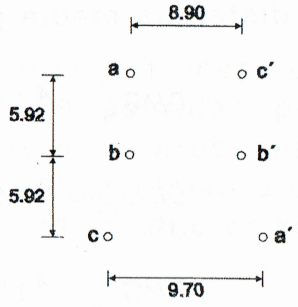
La admitancia capacitiva es también:

$$Y_C = b_c = \frac{9.085 \times 10^{-6}}{LOG \frac{\sqrt[3]{DMG_{AB} \; DMG_{BC} \; DMG_{AC}}}{\sqrt[3]{RMG_A \; RMG_B \; RMG_C}}} \; SIEMENS / KM / FASE$$

Ejemplo

Calcular X_L, e Y_C, para una línea de transmisión de 230 kV con d
circuito, que usa un conductor por fase y por circuito
900 kCM, tipo canario ACSR 54/7, con 29.5 mm de diámetr
r = 0.0730 Ω /KM/FASE a 50° C y 60 Hz, la configuración de
conductores es la indicada:





Solución

$$d_{ab}1 = d_{bc}1 = \sqrt{(8.90)^2 + (5.92)^2} = 10.68$$

$$dac' = dbb' = 8.90\ M;\ \ dab = db'c' = \ 5.92\ M$$

$$da'b' = dbc = \sqrt{(5.92)^2 + (0.40)^2} = 5.93M$$

$$dba' = db'c = \sqrt[2]{(5.92)^2 + (9.30)^2} = 11.02\,M$$

$$daa' = dcc' = \sqrt[2]{(9.30) + (11.84)^2} = 15.05M$$

$$da'c' = dac = \sqrt[2]{(11.84)^2 + (0.40)^2} = 11.84$$

La distancia media geométrica:

$$DMG_{AB} = \sqrt[4]{5.92 \times 10.68 \times 11.02 \times 5.93} = 8.01M$$

$$DMG_{BC} = \sqrt[4]{5.93 \times 10.68 \times 11.02 \times 5.92} = 8.01$$

$$DMG_{CA} = \sqrt[4]{11.84 \times 8.90 \times 9.70 \times 11.84} = 10.48M$$

$$DMG = \sqrt[3]{8.01 \times 8.01 \times 10.48} = 8.76M$$

Los radios medio geométricos son los siguientes:

$$RMG_A = \sqrt{r\,daa'} = \sqrt{1.475 \times 1505} = 47.11CM$$

$$RMG_B = \sqrt{rdbb'} = \sqrt{1.475 \times 890} = 36.23CM$$

$$RMG_C = \sqrt{rdcc'} = \sqrt{1.475 \times 1505} = 47.11CM$$

El radio medio geométrico del arreglo:

$$RMG = \sqrt[3]{47.11 \times 47.11 \times 36.23} = 43.16\,CM$$

Las reactancias inductiva y admitancia capacitiva s
respectivamente:

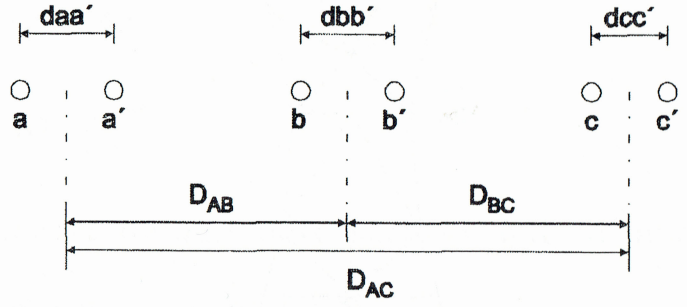
$$X_L = 0.1736 \; LOG \frac{876}{43.16} = 0.227 \; \Omega / KM / FASE$$

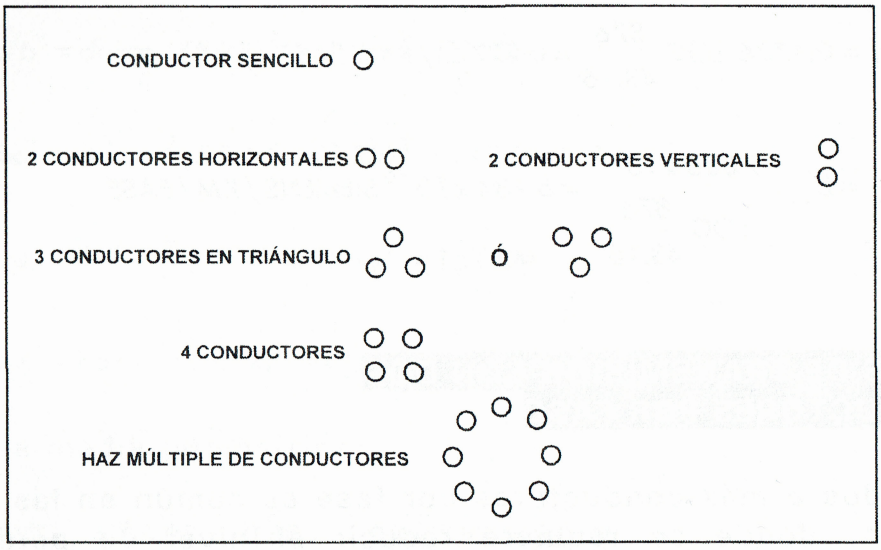
$$Y_C = b_c = \frac{9.085 \times 10^{-6}}{LOG \frac{876}{43.16}} = 6.984 \times 10^{-6} \; SIEMENS / KM / FASE$$

7 LÍNEAS DE TRANSMISIÓN CON DOS CONDUCTORES POR FASE

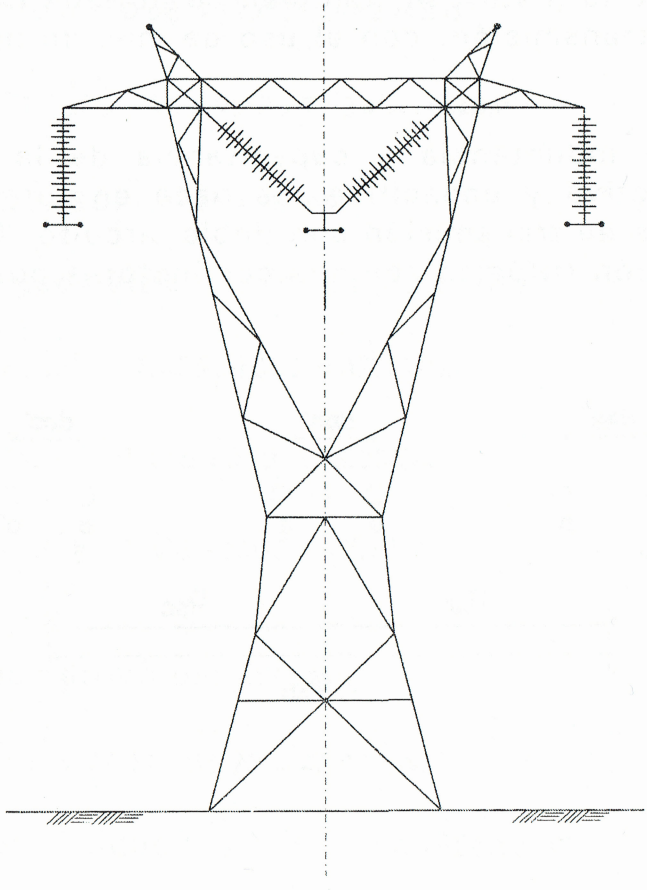
El uso de dos o más conductores por fase es común en las líneas de transmisión, donde se requiere reducir el nivel de pérdidas por corona y de ruido (radio interferencia) que representan los problemas más comunes que lo justifican; también se obtiene un incremento en la capacidad de transmisión, con el uso de más de un conductor por fase.

El cálculo de la inductancia y capacitancia de la línea o de las reactancias inductiva y capacitiva, se hace en forma semejante al caso de las líneas de transmisión con doble circuito. Considérese una línea de transmisión trifásica con dos conductores por fase.





CONFIGURACIONES TÍPICAS DE CONDUCTORES POR FASE



A diferencia de las líneas de transmisión con doble circuito en las líneas con dos o más conductores por fase, la distancia entre conductores de una misma fase es pequeña, en comparación con la distancia entre fases, por lo que se puede tomar en forma aproximada:

$$daa' = dbb' = dcc' = d$$

El radio medio geométrico es entonces:

$RMG = \sqrt{r\,d}$ (para dos conductores por fase)

r = Radio del conductor

d = Distancia entre centros de conductores de una misma fase.

La distancia media geométrica se calcula de acuerdo con el procedimiento general, como:

$$DMG = \sqrt[3]{D_{AB} \times D_{BC} \times D_{CA}}$$

La distancia media geométrica se calcula en la misma forma para cualquier número de conductores/fase; en cambio, para generalizar el radio medio geométrico para cualquier número de conductores/fase, se emplea la expresión:

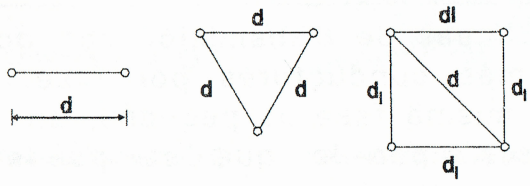
$$RMG = REQ = Rn\sqrt{\frac{nr}{R}}$$

n = Número de conductores/fase, que forman el haz.

r = Radio de un conductor.

R = Radio equivalente del arreglo de conductores.

REQ = Radio equivalente.



2 Conductores 3 Conductores 4 Conductores

$$R = \frac{d}{n \ SEN \frac{\pi}{n}}$$

La reactancia se calcula como:

$$X_L = 0.1736 \ LOG \frac{DMG}{RMG} \Omega / KM / FASE$$

La susceptancia a tierra:

$$Y_C = \frac{9.085 \times 10^{-6}}{LOG \frac{DMG}{RMG}} SIEMENS / KM / FASE$$

Ejemplo ✳

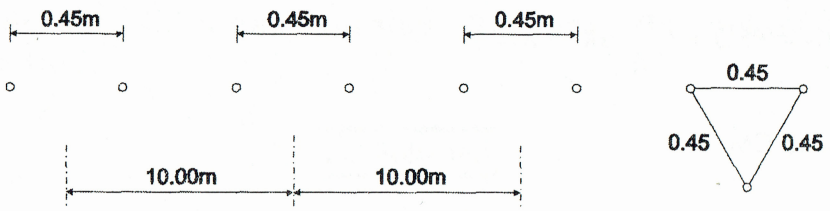
Calcular la reactancia inductiva y la susceptancia; para una línea transmisión de 400 kV, que usa conductores de ACSR de 1113 kC para los siguientes casos:

a) Un conductor por fase.

b) Dos conductores por fase.

El conductor es bluejay 1113 kCM, d = 3.25 cm (54/19)

La configuración y datos de conductores se muestra a continuación



Solución

a) Para un conductor/fase.

$$DMG = \sqrt[3]{10 \times 10 \times 20} = 12.6M$$

$$RMG = \frac{3.25}{2} = 1.625\,cm$$

Esto es válido cuando se dispone del valor RMG, se puede tomar en su lugar el radio(r) del conductor.

$$X_L = 0.1736\ LOG\frac{1260}{1.625} = 0.501\Omega/KM/FASE$$

Para la longitud total de 400 km.

$$X_{LT} = 400 \times 0.501 = 200.40\,\Omega/FASE$$

$$Y_C = \frac{9.085 \times 10^{-6}}{LOG\dfrac{1260}{1.625}} = 3.14 \times 10^{-6}\ SIEMENS/KM/FASE$$

$$Y_{CT} = 400 \times 3.14 \times 10^{-6} = 1.25 \times 10^{-3}\ SIEMENS/FASE$$

b) Para dos conductores/fase.

La DMG es la misma, sólo cambia RMG.

$$DMG = 12.6M$$

$$RMG = REQ = n\sqrt{\frac{nr}{R}}\ xR \qquad n = 2$$

$$d = 45\,CM$$

$$R = \frac{d}{n\ SEN\frac{\pi}{n}} \qquad R = \frac{45}{2\ SEN\frac{180}{2}} = 22.5\ CM$$

$$RMG = 22.5\sqrt{\frac{2x1.625}{22.5}} = 8.55\,CM$$

$$X_L = 0.1736\ LOG\frac{1260}{8.55} = 0.376\ \ OHMS/KM/FASE$$

$$X_{LT} = 400\ x\ \ 0.376 = 150.5\ \ OHMS/FASE$$

$$Y_C = \frac{9.085\ x\ 10^{-6}}{LOG\frac{1260}{8.55}} = 4.19\ x\ 10^{-6}\ SIEMENS/KM/FASE$$

$$Y_{CT} = 400\ x\ 4.19\ x\ 10^{-6} = 1.67\ x\ 10^{-3}\ SIEMENS/FASE$$

Ejemplo

Una línea de transmisión de 230 kV, 60Hz, se construye c
conductores ACSR de 113 KCM, tipo blue jay y relación
conductores 4517, con una separación entre fases adyacentes
7.5 m, la longitud total de la línea es de 160 Km, se desea:

a) Calcular la máxima potencia que puede transportar la línea.

b) Calcular resistencia eléctrica a 55°C para la longitud total.

c) Calcular la inductancia, capacitancia, reactancia inducti
reactancia capacitiva y susceptancia capacitiva.

d) Calcular las pérdidas totales RI^2 para la máxima potencia transmitida.

Solución

a) La potencia natural de esta línea es:

$$S = \frac{V^2}{Z_0}$$

para una línea de 230 kV, $Z0 = 313\Omega$

$$S = \frac{(230)2}{313} = \quad 169\,MW$$

La corriente que puede transportar a un factor de potencia 0.9 es:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}\,V\cos\theta} = \frac{169x10^6}{\sqrt{3}\,(230)(0.9)} = 471A$$

El calibre del conductor de acuerdo a la corriente es: 477 KCM

R = 0.163Ω/Km-fase a 25°C

Para una línea de 160 Km

$$RT = 0.163 \times 160 = 26.08\ \Omega/fase$$

b) Las pérdidas trifásicas para la línea:

$$P = 3RI^2 = 3(26.08)(471)^2 = 17.36\ MW$$

Como porcentaje:

$$\%P = \frac{P}{S} x100 = \frac{17.36}{169} x100 = 10.27\%$$

c) De la tabla de características del conductor sabemos:

$$R_{CA} = 0.0524\,\Omega/Km \text{ a } 25°C$$

Aplicando el factor de corrección por temperatura para obte
resistencia eléctrica de conductores de cobre o aluminio
temperaturas diferentes a 25 °C.

$$R_{CA\,55°C} = 0.059 \times 160 = 9.44\Omega$$

d) De la tabla de características del conductor:

RMG 12.65 mm

$$DMG = \sqrt[N]{D1\ D2\ D3...DN} = \sqrt[3]{D1\ D2\ D3} = \sqrt[3]{7.5 \times 7.5 \times 15} = 9.4$$

La reactancia inductiva a 60 HZ:

$$X_L = 0.1736 \times \log \frac{DMG}{RMG}$$

$$X_L = 0.1736 \times \log \frac{9450}{12.65} = 0.5\,\Omega/Km - fase$$

La reactancia capacitiva:

$$X_C = \frac{0.0241}{\log \frac{DMG}{RMG}}$$

$$X_C = \frac{0.0241}{\log \frac{9450}{12.65}} = 8.39 \times 10^{-3}\,\Omega/Km - fase$$

La susceptancia capacitiva:

$$b_c = \frac{1}{X_C} = \frac{9.085 \times 10^{-6}}{\log \frac{DMG}{RMG}}$$

$$b_c = \frac{9.085 \times 10^{-6}}{\log \frac{9450}{12.65}} = 3.16 \times 10^{-6} \text{ siemens/Km - fase}$$

Para una línea de 230 kV, Z0 = 313Ω

La inductancia:

$$L = 4 \times 10^{-7} \left[\ln \frac{DMG}{RMG} \right]$$

$$L = 4 \times 10^{-7} \left[\ln \frac{9450}{12.65} \right] = 2.65 \times 10^{-6} \text{ H/m}$$

$$C = \frac{\Pi \times 8.85 \times 10^{-12}}{\ln \frac{DMG}{RMG}}$$

$$C = \frac{\Pi \times 8.85 \times 10^{-12}}{\ln \frac{9450}{12.65}} = 4.20 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

Ejemplo

Repetir el problema anterior, suponiendo que ahora la línea de transmisión tiene 2 conductores por fase, separados 30 cm.

Solución

Para conductores por fase de D = 31.98, por tablas especificaciones del conductor:

$$RMG = R \sqrt[n]{\frac{2r}{R}}$$

$$R = \frac{d}{n\ sen\ \frac{\Pi}{n}} = \frac{30}{2\ sen\ \frac{\Pi}{2}} = 15\Omega / Km - fase$$

$$RMG = 152\sqrt{\frac{2x15.99}{150}} = 6.93\ cm$$

La reactancia inductiva a 60 Hz:

$$X_L = 0.1736\ x\ log\ \frac{DMG}{RMG}$$

$$X_L = 0.1736\ x\ log\ \frac{945}{6.93} = 0.37\ \Omega/Km - fase$$

La reactancia capacitiva:

$$X_c = \frac{0.0241}{log\ \frac{DMG}{RMG}}$$

$$X_c = \frac{0.0241}{log\ \frac{945}{6.93}} = 0.01\Omega/Km - fase$$

La susceptancia capacitiva:

$$b_c = \frac{1}{X_c} = \frac{9.085 \times 10^{-6}}{\log \frac{DMG}{RMG}}$$

$$b_c = \frac{9.085 \times 10^{-6}}{\log \frac{945}{6.93}} = 2.90 X 10^{-6} \ siemens/Km - fase$$

Para una línea de 230 kV, $Z_0 = 313\Omega$

La inductancia:

$$L = 4 \times 10^{-7} \left[ln \frac{DMG}{RMG} \right]$$

$$L = 4 \times 10^{-7} \left[ln \frac{9450}{6.93} \right] = 2.89 \times 10^{-6} \ H/m$$

$$C = \frac{\Pi \times 8.85 \times 10^{-2}}{ln \frac{DMG}{RMG}}$$

$$C = \frac{\Pi \times 8.85 \times 10^{-12}}{ln \frac{9450}{6.93}} = 3.85 \times 10^{-12} \ F/m$$

La potencia natural de esta línea es: $S = \frac{V^2}{Z_0}$

$$S = \frac{(230)^2}{866.4} = 61.06 \ MW$$

La corriente que puede transportar a un factor de potencia 0.9 es:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}\, V \cos\theta} = \frac{61.06x10^6}{\sqrt{3}\,(230)(0.9)} = 170.5A$$

$R = 0.163\ \Omega/Km$ – fase a 25°C

Para una línea de 160 Km

$R_T = 0.163 \times 160 = 26.08\ \Omega/fase$

e) Las pérdidas trifásicas para la línea:

$$P = 3RI^2 = 3\,(26.08)(170.5)^2 = 2.27\ MW$$

Como porcentaje:

$$\%P = \frac{P}{S} x\,100 = \frac{2.27}{61.06} x\,100 = 3.72\%$$

Ejemplo

Repetir el problema anterior, considerando ahora 3 conductores por fase, con disposición en triángulo equilátero, separados 30 cm.

Solución

Para tres conductores por fase de $D = 31.98$, por tablas especificaciones del conductor:

$$RMG = R\ \sqrt[n]{\frac{r\,n}{R}}$$

$$R = \frac{d}{n \ sen \frac{\Pi}{n}} = \frac{30}{3 \ sen \frac{\Pi}{3}} = 3.6 \ cm$$

$$RMG = 3.6 \sqrt[2]{\frac{3x15.99}{36}} = 3.96 \ cm$$

La reactancia inductiva a 60 Hz:

$$X_L = 0.1736 \ x \ log \frac{DMG}{RMG} =$$

$$X_L = 0.1736 \ x \ log \frac{945}{3.96} = 0.41 \ \Omega/Km - fase$$

La reactancia capacitiva:

$$X_c = \frac{0.0241}{log \frac{DMG}{RMG}}$$

$$X_c = \frac{0.0241}{log \frac{945}{3.96}} = 0.01 \ \Omega/Km - fase$$

La susceptancia capacitiva:

$$b_c = \frac{1}{X_c} = \frac{9.085 \ x \ 10^{-6}}{log \frac{DMG}{RMG}} =$$

$$b_c = \frac{9.085 \ x \ 10^{-6}}{log \frac{945}{3.96}} = 24.05 \ x \ 10^{-6} \ siemens/Km - fase$$

Para una línea de 230 kV, $Z_0 = 933.35\Omega$

La inductancia:

$$L = 4 \times 10^{-7} \left[\ln \frac{DMG}{RMG} \right]$$

$$L = 4 \times 10^{-7} \left[\ln \frac{9450}{3.96} \right] = 3.11 \times 10^{-6} \; H/m$$

$$C = \frac{\Pi \times 8.85 \times 10^{-12}}{\ln \frac{DMG}{RMG}}$$

$$C = \frac{\Pi \times 8.85 \times 10^{-12}}{\ln \frac{9450}{3.96}} = 3.57 \times 10^{-12} \; F/m$$

La potencia natural de esta línea es $S = \frac{V^2}{Z_0}$

$$S = \frac{(230)^2}{933.35} = 56.68 \; MW$$

La corriente que puede transportar a un factor de potenci es:

$$I \frac{S}{\sqrt{3}\, V \cos\theta} = \frac{56.68}{\sqrt{3}\,(230)(0.9)} = 158.3 \; A$$

$$R = 0.163 \; \Omega/Km - fase \; a \; 25°C$$

Para una línea de 160 Km:

$$R_T = 0.163 \times 160 = 26.08 \; \Omega/fase$$

e) Las pérdidas trifásicas para la línea:

$$P = 3RI^2 = 3(26.08)(158.3)^2 = 12.38\,MW$$

Como porcentaje:

$$\%P = \frac{P}{S} \times 100 = \frac{12.38}{56.68} \times 100 = 21.84\%$$

Elaborar una tabla comparativa de los tres casos anteriores incluyendo:

Resistencia a 55°C, inductancia, capacitancia, reactancia inductiva, reactancia capacitiva y pérdidas RI^2.

No. de Conductores por fase	Resistencia a 55° C Ω	Inductancia	Capacitancia	Reactancia Inductiva Ω/Km-f	Reactancia Capacitiva Ω/Km-f	Pérdidas RI^2 MW	Pérdidas RI^2 %
1	9.44	2.65×10^{-6}	4.20×10^{-12}	0.5	3.89×10^{-3}	17.36	10.27
2	9.44	2.89 x 10-6	3.85×10^{-12}	0.37	0.01	2.27	3.72
3	9.44	3.11 x 10-6	3.57×10^{-12}	0.41	0.01	12.38	21.84

a 0.9